

# 국내 강섬유를 사용한 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 균열 및 변형특성

## Crack and Deformation Behaviors of Steel Fiber Reinforced Concrete Slab Model Specimens Using Domestic Steel Fiber

박 승 범\*      홍 석 주\*\*      이 봉 춘\*\*      조 춘 근\*\*\*  
Park, Seung Bum    Hong, Seok Joo    Lee, Bong Chun    Cho, Chun Gun

### Abstract

This study is to investigate the properties on the load-deflection and fracture behaviors of the steel fiber reinforced concrete(SFRC) slab model specimens. Steel fibers of indent, crimp, and end hook shape were considered to reinforce the matrix under various mixing conditions and proportions. Initial cracking load, maximum load, and energy absorption capacity(load carrying capacity) of SFRC panel specimen increased with increase of steel fiber contents. And the plain concrete slab was fractured abruptly after maximum load but SFRC slabs were fractured smoothly by steel fibers in concrete matrix operated as cracking resistance force after maximum load. Indent, crimp, and end hook shape steel fibers were effective in reinforcing the matrices but end hook type fiber were superior to indent and crimp type fibers.

Keywords : load-deflection properties, fracture behavior, stiffness, initial cracking load, maximum load, energy absorption capacity, load carrying capacity

### 1. 서 론

강섬유보강 콘크리트(steel fiber reinforced concrete, SFRC)는 보통콘크리트의 단점인 낮은 인장강도와 휨강도를 증대시키고 정적·동적 하중하에서 급격한 파괴를 일으키는 취성적 성질을 개선시키는데 매우 효과적인 것으로 알려져 있다. 그러므로 미국, 일본 등의 선진국에서는 충격하중과 반복하중을 받는 도로포장, 공항 활주로, 수리항만 구조물 및 터널라이닝 등에 널리 사용되고 있다. 또한 국내에서도 최근 강섬유보강 콘크리트의 합리적인 적용을 위하여 강섬유의 혼입률, 섬유배향, 시멘트매트릭스의 특성등에 대한 연구가 일부 연구진에 의해 활발히 진행되고 있다. 강섬유보강 콘크리트를 도로포장, 교량상판 및 터널라이닝 등의 판부재로 적용하기 위해서는 강섬유보강 콘크리트 슬래브에 대한 응력의 분산작용과 균열특성 및 각 인자들의 영향에 대한 분석 및 적용연구가 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 도로의 포장판, 교량상판슬래브 및 터널라이닝 등의 판부재로서 강섬유보강 콘크리트의 합리적인 적용을 위하여 각 매트릭스 요인별로 슬래브 모델 공시체를 제작하여 국내·외 강섬유의 특성 및 혼입률별 강도특성과 하중-변위의 관계, 균열특성 및 내력특성을 파악하기 위한 실험적

\* 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 충남대학교 대학원 토목공학과 석사과정

연구를 수행하였다.

## 2. 사용재료 및 시험방법

### 2.1 사용재료

시멘트는 국내 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 골재는 금강 상류에서 채취한 강 모래와 충남 금산 H사에서 생산되는 최대치수 25mm의 부순돌을 사용하였으며, 잔골재 및 굵은골재의 물리적 특성은 표 1에 나타난 바와 같다.




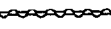
또한 강섬유는 벨기에 B사의  $\phi 0.5 \times 30\text{mm}$ ,  $\phi 0.8 \times 60\text{mm}$ 제품과 국내 C사 제품의  $\phi 0.6 \times 36\text{mm}$ 의 3종류 양단후크형(End Hook형)강섬유와 국내 K사 제품의  $\phi 0.5 \times 30\text{mm}$ 인 원형단면 파형(Crimp형)강섬유와 국내 Y사 제품의  $0.3 \times 1.2 \times 33\text{mm}$ 인 사각형단면 파형(Crimp형)강섬유와 국내 H사의  $0.4\text{mm}$ (폭)  $\times 0.8\text{mm}$ (두께)  $\times 36\text{mm}$ (길이)인 직선톱니형(Indent형)강섬유를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 표 2와 같다.

한편, 굳지 않은 강섬유보강 콘크리트의 적정 컨시스턴시(침하도 30sec) 확보를 위하여 고성능감수제로서 일본 K사 제품의 나프탈렌 설폰산염 고축합물계인 Mighty 150을 사용하였다.

표 1. 사용골재의 물리적 특성

잔 골 재				굵 은 골 재					
조립률	비 중	흡수율 (%)	단위중량 (tonf/m <sup>3</sup> )	최대치수 (mm)	조립률	비 중	흡수율 (%)	단위중량 (tonf/m <sup>3</sup> )	
2.68	2.59	1.40	1.65	25	7.01	2.65	1.32	1.67	

표 2. 강섬유의 형상 및 물리적 특성

강섬유 형상		단면형상 · 치수 (mm)		길 이 (mm)	아스펙트비 (l/d)	비 중	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	양단 후크형	원형	B	$\phi 0.8$	60	75	7.85	11,000	$2.1 \times 10^6$
			B1	$\phi 0.5$	30	60			
			C	$\phi 0.6$	36	60			
	파형	원형	K	$\phi 0.5$	30	60	7.85	7,000	$2.1 \times 10^6$
	파형	사각형	Y	$0.3 \times 1.2$	33	49	7.85	11,000	$2.1 \times 10^6$
	직선톱니형	사각형	H	$0.4 \times 0.8$	36	56	7.6	8,000	$2.1 \times 10^6$

### 2.2 배합 및 믹싱방법

강섬유의 종류 및 혼입률별 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 균열 및 변형특성을 평가하기 위하여 배합은 시험배합을 통하여 공기량이 4%, 침하도가 30sec가 되도록 배합조건을 선정하였다. 강섬유의 형태별 특성을 평가하기 위하여 5종류의 강섬유를 각각 0.5% 혼입 하였고 강섬유혼입률별 특성을 파악하기 위하여  $\phi 0.8 \times 60\text{mm}$ 의 양단 후크형 강섬유를 매트릭스의 절대용적비로 0, 0.25, 0.5, 0.75,

1.0%를 혼입하여 보통 콘크리트와 비교·검토하였으며, 강섬유보강 콘크리트의 배합은 표 3에 나타난 바와 같다.

표 3. 강섬유보강 콘크리트 패널공시체의배합

배합 번호	강섬유 종 류	강섬유 혼입률	Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	air (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )				
							C	W	S	G	SF
Plain		0	25	45.3	45	4.0	375	170	782	978	0
K-0.5	원형과형	0.5							776	970	39.3
C-0.5	∅0.6×36 양단후크형	0.5							776	970	39.3
Y-0.5	사각형과형	0.5							776	970	39.3
H-0.5	직선톱니형	0.5							776	970	39.3
BI-0.5	∅0.5×30 양단후크형	0.5							776	970	39.3
B-0.25	∅0.8×60 양단후크형	0.25							779	974	19.6
B-0.5		0.5							776	970	39.3
B-0.75		0.75							773	966	58.9
B-1.0		1.0							770	963	78.5

한편, 강섬유보강 콘크리트의 혼합은 섬유가 콘크리트 내에서 균등분산되고, 강섬유가 뭉치는 현상(Fiber-bali)을 방지하기 위하여 일본 C사 제품인 용량 30ℓ의 섬유분산용 Omni-Mixer를 사용하였으며, 재료의 투입은 먼저 잔골재와 굵은 골재를 혼합한 후 일정한 속도로 믹서에 강섬유를 혼입한 다음 시멘트, 물과 혼화제를 혼입하여 믹싱하였다.

### 2.3 공시체 제작 및 시험방법

강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 시험은 크기 60×60×10cm(L×B×t)의 패널공시체를 제작하여 프랑스 SNCF(철도국)와 Alpes Essais Laboratory of Grenoble가 공동개발한 방법에 따라서 실시하였다. 강섬유보강 콘크리트 패널공시체는 성형시 진동다짐을 실시하고, 섬유가 돌출되지 않도록 표면을 마무리하여 제작하였으며, 재령 1일에 탈형하여 시험재령시까지 상온에서 양생포로 덮은후 시험재령까지 살수하여 양생하였다

슬래브 모델의 시험은 패널공시체를 내부단면적이 50×50cm인 금속프레임 위에 설치하고, 패널공시체의 중앙에 10×10×5cm(B×L×t)크기의 가압판을 설치하여 하중을 가하여 패널공시체의 하단으로부터 재하 하중별 처짐량을 측정 하였으며, 균열의 발생 및 진전상태, 슬래브 모델의 파괴형태를 관찰하였다. 이때 하중은 보통 콘크리트 패널공시체의 경우에는 파괴될 때까지 재하하고, 강섬유보강 콘크리트 패널공시체의 경우에는 중심부에서의 변위가 25mm를 초과 할 때까지 하중을 가하여 하중-처짐 곡선을 구하였으며, 최대하중 및 25mm 변위를 일으킬 때까지의 에너지 흡수능력 및 파괴거동을 평가하였다.

## 3. 시험결과 및 고찰

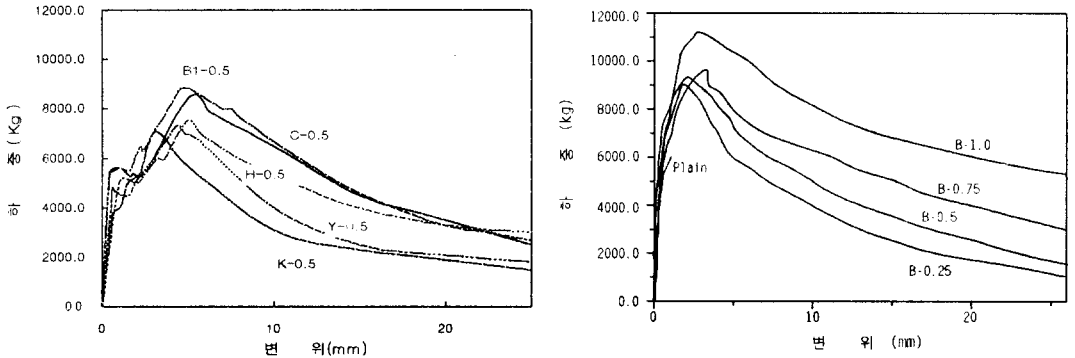
### 3.1 균열발생 이전의 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 거동

### 3.1.1 강 성

강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 하중-처짐곡선을 그림 1에 나타내었으며, 보통 콘크리트 슬래브와 강섬유의 혼입률에 따른 강섬유보강 콘크리트의 강성을 고찰해보면 양단 후크형 강섬유( $\phi 0.8 \times 60\text{mm}$ )를 혼입한 경우 강섬유 혼입률이 0.25, 0.5, 0.75, 1.0%로 증가함에 따라 강성이 각각 0.93, 0.89, 0.88, 0.86으로 나타나 강섬유 혼입률에 따른 강성의 차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타나 강섬유 혼입에 의한 매트릭스 강성의 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

### 3.1.2 초기균열하중

강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 초기균열하중은 양단 후크형 강섬유( $\phi 0.8 \times 60\text{mm}$ )를 0.25% 혼입한 경우에도 보통 콘크리트에 비하여 약 1.5배 이상 증가하였고, 이러한 경향은 특히 강섬유 혼입률 증가에 따라 현저히 증가하여 1.0% 혼입한 경우에는 2.1배 증가하는 것으로 나타나 강섬유의 혼입은 초기균열의 발생을 억제시키는데 상당히 효과적임을 확인하였다. 또한 동일 섬유혼입률( $V_{SF}=0.5\%$ )의 섬유 형상에 대해서는 양단후크형 강섬유를 사용한 경우가 다른 형상의 섬유를 사용한 경우에 비해 다소 높은 초기균열하중을 갖는 것으로 나타났다.



(a) 강섬유 종류별 (0.5 vol%)

(b) 강섬유 혼입률별

그림 1. 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델 중심부에서의 하중-처짐곡선

표 4. 강섬유보강 콘크리트 패널공시체의 시험결과

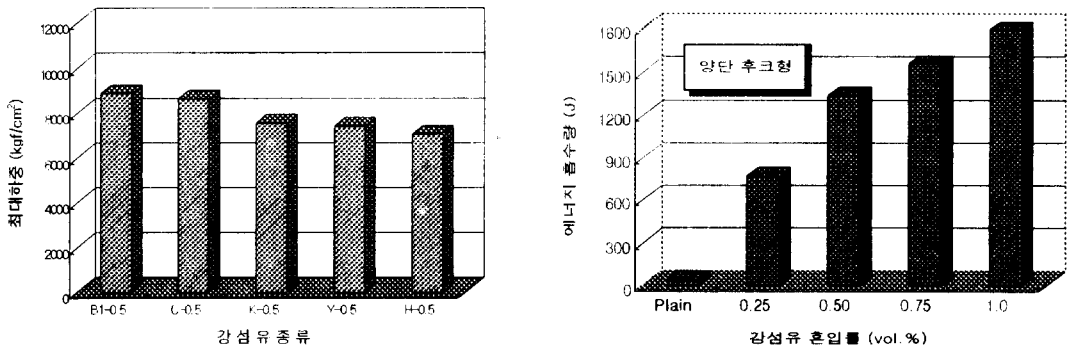
배합번호	강섬유혼입률 (vol.%)	초기균열하중		최대 하중		25mm까지의 흡수에너지 (J)
		하중(kg)	하중비	하중(kg)	하중비	
Plain	0	3400	1.00	5700	1.00	40
B-0.25	0.25	5200	1.53	6700	1.18	769
B-0.5	0.5	6100	1.79	9600	1.68	1329
B-0.75	0.75	6300	1.85	10,200	1.79	1552
B-1.0	1.0	7100	2.09	11,200	1.97	1786
B1-0.5	0.5	5400	1.59	8871	1.56	1302
C-0.5	0.5	5300	1.56	8643	1.52	1286
K-0.5	0.5	5100	1.50	7560	1.33	1175
Y-0.5	0.5	4800	1.41	7425	1.30	914
H-0.5	0.5	3800	1.12	7077	1.24	851

### 3.2 균열발생 이후의 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 거동

#### 3.2.1 최대하중 및 처짐변형특성

재령 28일에서의 강섬유보강 콘크리트 패널공시체의 최대하중은 표 4 및 그림 1에 나타난 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 최대하중은 보통 콘크리트에 비하여 강섬유혼입률이 증가함에 따라 현저히 증가하는 경향을 나타내었으나, 강섬유를 0.25% 혼입한 경우에는 최대하중의 증가는 보통 콘크리트에 비하여 약 18% 정도에 불과하여 내하력 증진은 크게 기대할 수 없으며, 0.5~1.0% 혼입시 최대하중이 68~97% 정도 증가하는 것으로 나타나 내하력 증진을 위해서는 강섬유를 0.5% 이상 혼입하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 또한 동일 섬유혼입률의 강섬유의 종류에 따른 최대하중은 초기균열하중에서와 같이 양단 후크형 강섬유를 혼입한 경우가 직선톱니형 및 파형 강섬유를 혼입한 경우보다 높은 최대하중을 갖는 것으로 나타났다.

보공시체의 휨시험에서는 최대하중이 초기균열하중을 크게 초과하지 않았으나, 패널공시체의 휨시험에서는 초기균열 발생후 하중의 재분배로 인하여 최대하중까지 하중이 계속 증가하였으며 초기균열이 발생하여 매트릭스는 응력을 받지 못하는 상태에서도 강섬유에 의해 계속적으로 내하력을 가지고 있는 것으로 나타났다.



(a) 슬래브 모델의 최대하중 (0.5 vol.%)

(b) 슬래브 모델의 에너지 흡수량 (0.8×60 mm)

그림 2. 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 최대하중과 에너지 흡수량

#### 3.2.2 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델 중심부에서의 에너지흡수량

강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델 중심부에서의 25mm 변위까지의 에너지흡수량은 표 4 및 그림 2에 나타내었다. 이를 고찰하여 보면, 보통 콘크리트의 경우에는 25mm의 변위를 일으키기 전에 파괴되었으나, 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 경우 25mm 변위까지의 에너지흡수량은 섬유혼입률이 증가함에 따라 현저히 증가하여 강섬유를 0.25, 0.5, 0.75 및 1.0 vol.% 혼입한 경우에는 보통 콘크리트에 비하여 에너지흡수량은 각각 19배, 33배, 39배, 45배정도 증가하는 것으로 나타나, 강섬유의 혼입은 에너지흡수능력 증진에 상당히 효과적임을 확인하였다.

또한 강섬유의 형태에 따른 영향을 살펴보면, 동일 섬유혼입률에서 양단 후크형 강섬유를 혼입한 경우가 직선톱니형 및 파형 강섬유를 혼입한 경우보다 에너지 흡수능력이 우수한 것으로 나타났다.

#### 3.2.3 파괴거동

하중단계별 균열의 발전형태를 관찰한 결과, 보통 콘크리트 패널공시체의 경우에는 최대하중 재하시의 처짐이 작아 최대하중까지의 강성저하는 작지만, 하중전달이 주로 대각선 방향으로 발생하여 십자형태의 균열이 발전되고 최대하중 이후에 급격한 파괴를 일으키나 강섬유보강 콘크리트 패널공시체의

경우에는 강섬유의 종류에 관계없이 초기균열이 발생하기 이전에는 탄성거동을 일으키고, 초기균열이 발생한 이후 하중재하 부위에서 접선방향으로 다수의 방사형 미세균열이 발생되어 진전되면서 소성거동을 나타낸다. 또한 강섬유의 길이에 대해서도 공시체의 균열폭과 균열 발생률은 섬유의 길이가 길수록 균열폭은 작아지고 균열 발생률은 큰 것으로 나타나, 강섬유보강 콘크리트의 패널 공시체는 강섬유 혼입과 강섬유의 형상 및 길이에 의해 현저한 균열저항성능 개선효과 및 파괴시까지의 에너지 흡수능력 개선효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

국내·외 강섬유의 혼입률별, 형태별, 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 휨시험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강섬유보강 콘크리트 패널공시체의 초기균열하중 및 최대하중은 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 증가하였고, 0.25% 혼입한 경우는 내하력 증진을 크게 기대할 수 없으므로 내하력의 효율적 증진을 위해서는 혼입률 0.5% 이상의 강섬유보강 콘크리트 사용이 바람직한 것으로 판단된다.
- (2) 강섬유보강 콘크리트 패널공시체 중심부에서의 에너지 흡수능력은 강섬유의 혼입률이 증가할수록 현저한 에너지 흡수능력을 나타내며 강섬유의 형상에 대해서는 양단후크형의 섬유가 다른 종류의 섬유에 비해 다소 큰 에너지 흡수능력을 나타내는 것으로 나타났다.
- (3) 보통 콘크리트의 파괴 거동은 하중전달이 대각선 방향으로 발생하여 십자 형태의 균열이 발전되어 최대하중 이후 급격한 파괴를 일으킨 반면, 강섬유보강 콘크리트의 경우에는 강섬유 혼입률의 증가에 따라 하중 재하부위에 방사형 미세균열이 많이 발생하여 최대하중 이후의 강성은 저하되지만 하중저하가 완만하게 진행되어 휨내력이 현저히 개선되었다.
- (4) 강섬유의 종류에 따라서는 동일 강섬유혼입률( $V_{SF}=0.5\%$ )의 경우 양단 후크형 강섬유를 사용한 경우가 파형이나 직선톱니형의 강섬유를 사용한 경우에 비하여 초기균열하중 및 최대하중, 에너지 흡수능력, 내하력 및 처짐변형특성이 개선되는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 충남대학교와 동부건설(주) 기술연구소와 공동으로 수행된 건교부 '97 건설기술연구개발사업의 연구내용중 일부임을 밝히며, 본 연구를 위하여 협조하여 주신 관계당국과 여러분께 깊은 감사를 드립니다

#### 참고문헌

1. D. Beckett, J. Humphreys, 「Comparative Tests on Plain, Fabric Reinforced and Steel Fibre Reinforced Concrete Ground Slabs」, The Thames Polytechnic, Dartford, 1989
2. 「Fiber Reinforced Concrete」, SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp.452
3. 베칼트社製 「ドラミックス」を用いた 繊維補強 吹付け 콘크리트의 靱性試験(大型供試体による 載荷試験) 報告書 平成 10年 3月 八洋コンクリト コンサルタント(株)
4. 박승범 외, 「에너지절약형 고기능 섬유보강 콘크리트의 개발 및 설계·시공 지침(안) 작성에 관한 연구」, 건설교통부 연구보고서, 1997.10
5. 박승범 외, 「강섬유의 형태별 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델의 균열 및 변형특성」 한국토목학회 학술발표회 논문집, Vol.1 p233~236, 1998.10